
ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ

NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

УДК 550.34.038.8
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-133-140

ОЦЕНКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАКЛОНОМЕРА НА БАЗЕ МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

С. А. Волобуев, Е. А. Якушина*

Концерн „ЦНИИ «Электроприбор»“, Санкт-Петербург, Россия

** evgeniya.ykshn@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены составляющие инструментальной погрешности прецизионного наклономера, в котором в качестве чувствительных элементов используются маятниковые компенсационные акселерометры. Использование поворотной платформы в конструкции наклономера позволяет минимизировать воздействие температуры на результат измерения угла наклона поверхности и таким образом компенсировать изменение смещения нуля акселерометра во времени. Проведена оценка вызванных погрешностями акселерометров и поворотной платформы наклономера погрешностей измерения угла наклона фундамента, на который устанавливается испытательное оборудование, а также исследованы причины их возникновения. Предложены решения, позволяющие минимизировать влияние этих погрешностей.

Ключевые слова: измерение наклона поверхности, маятниковый компенсационный акселерометр, прецизионный наклономер, модель погрешностей, смещение нуля

Ссылка для цитирования: Волобуев С. А., Якушина Е. А. Оценка инструментальных погрешностей наклономера на базе маятникового компенсационного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 2. С. 133–140. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-133-140.

ASSESSMENT OF INSTRUMENTAL ERRORS OF A TILT METER BASED ON A PENDULUM COMPENSATION ACCELEROMETER

S. A. Volobuev, E. A. Yakushina*

Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia

** evgeniya.ykshn@yandex.ru*

Abstract. Components of instrumental error of a precision tilt meter, in which pendulum compensation accelerometers are used as sensing elements, are considered. The use of a rotary platform in the design of the tilt meter makes it possible to minimize the effect of temperature on the result of measuring the angle of inclination of the surface, and thus compensate for the change in the zero offset of the accelerometer over time. The errors in measuring the angle of inclination of the foundation on which the test equipment is installed caused by errors in accelerometers and the tilt platform of the tilt meter have been evaluated, and the causes of their occurrence have been investigated. Solutions are proposed to minimize the impact of these errors.

Keywords: surface tilt measurement, pendulum compensation accelerometer, precision tilt meter, error model, zero offset

For citation: Volobuev S. A., Yakushina E. A. Assessment of instrumental errors of a tilt meter based on a pendulum compensation accelerometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 2. P. 133–140 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-133-140.

Введение. Улучшение условий калибровки инерциальных навигационных систем (ИНС) и их чувствительных элементов [1] является важной задачей. Однако используемые при регулировании и калибровке ИНС стенды [2, 3] подвержены воздействию суточных и сезонных движений лабораторного фундамента. Оценка изменения наклонов базовых поверхностей, вызванного этими движениями, позволит организовать более точное проведение калибровки и испытаний благодаря возможности учета движения базовой поверхности при оценке параметров инерциальных навигационных систем и их чувствительных элементов (ЧЭ).

Целями работы являются исследование погрешностей измерения углов наклономером, вызванных неидеальностями чувствительных элементов и поворотного устройства, а также разработка математической модели, позволяющей учесть эти погрешности.

Конструкция наклономера. Предлагаемая конструкция наклономера состоит из трех основных устройств: акселерометры, поворотная платформа и плата управления. Два маятниковых акселерометра компенсационного типа (рис. 1, 1 — корпус, 2 — керамические пластины крепления торсиона, 3 — прижимная пластина (пружина), 4 — маятник, 5 — магнитопровод датчика момента, 6 — торсион маятника, 7 — прижимной винт, 8 — светодиод, 9 — фотодиод) являются чувствительными элементами наклономера [4]. Основным элемент акселерометра, маятник 4, закрепленный на металлическом торсионе 6 прямоугольного сечения, имеет степень свободы по углу поворота вокруг оси торсиона. Применение торсиона из электрически проводящего материала в конструкции маятникового компенсационного акселерометра позволяет обеспечить питание катушки обмотки датчика момента без дополнительных токоподводов, исключая, таким образом, возникновение дополнительных моментов тяжения. Кроме того, использование металлического торсиона дает возможность упростить конструкцию, технологию производства и сборки с сохранением точностных параметров прибора [4–10], по сравнению с кварцевыми или кремниевыми акселерометрами.

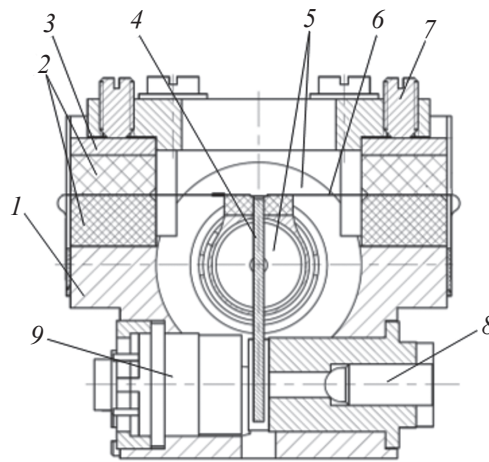


Рис. 1

Использование двух акселерометров с ортогонально расположенными осями чувствительности позволяет одновременно оценивать изменение наклона по двум осям. Использование поворотной платформы дает возможность уменьшить вклад основной погрешности акселерометров — компенсировать смещение нуля выходного сигнала акселерометра, осреднить измерения, полученные двумя приборами при одних и тех же положениях осей, что позволяет повысить точность измерения наклона.

Принцип автокомпенсации. Поворотная платформа дает возможность проводить измерения в двух противоположных точках на оси измерения (0 – 180°). При использовании двух ортогонально расположенных чувствительных элементов (рис. 2) с целью оценки составляющих измеряемого угла измерения производятся в четырех положениях поворотной платформы (0 , 90 , 180 , 270°) [11].

Проведение измерений в каждом из положений, со съемом данных на коротких интервалах времени (не более 5 минут во всех положениях), позволяет определять абсолютный наклон базовой поверхности. На этом принципе основана автокомпенсация изменения измеренного угла наклона, позволяющая снизить до минимума зависимость изменения измерения от смещения нулевого сигнала во времени или температуры окружающей среды.

Угол наклона измеряемой поверхности α (по оси X) или β (по оси Y) определяется как полуразность значений измеренных наклонов поверхности, полученных в двух противоположных точках на оси измерения. Смещение нулевого сигнала акселерометров может быть определено как полусумма этих значений.

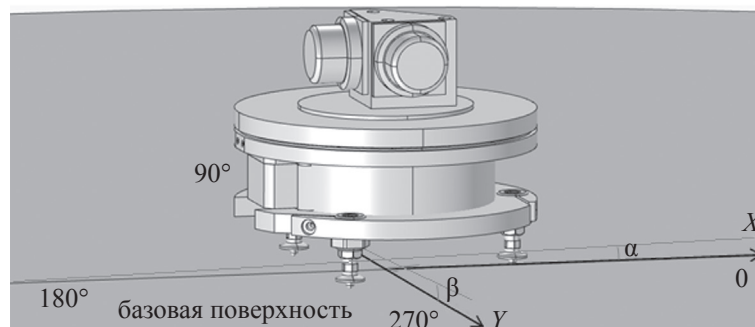


Рис. 2

Составляющие измеряемого угла наклона поверхности. Погрешности акселерометра, вносящие наибольший вклад: неортогональность оси чувствительности и оси измерения, а также нестабильность смещения нуля выходного сигнала [12]. Влияние нестабильности масштабного коэффициента можно не учитывать: экспериментальные исследования показали, что для используемого акселерометра изменение масштабного коэффициента от температуры составляет 0,02 %/°C, и наклономер будет использоваться для оценки изменения углов наклона базовых поверхностей стабильных фундаментов в лабораторных условиях, где изменение температуры составляет около ± 5 °C. Использование поворотной платформы обеспечивает описанные выше преимущества, но вносит дополнительные погрешности, вызванные непараллельностью поверхности вращения относительно базовой поверхности, погрешностями позиционирования поворотной платформы, а также связанные с качеством обработки поверхности вращения. Поэтому в выходном сигнале накломера необходимо учитывать (рис. 3)*:

- составляющие, вызванные наклоном базовой поверхности — α_g и β_g ;
- составляющие, вызванные смещением нуля акселерометров — $W_{0.1}$, $W_{0.2}$, где индекс „1“ означает первый акселерометр, „2“ — второй;
- составляющие непараллельности поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности — δ_{Ng} и φ_{Ng} , где N обозначает положение поворотной платформы накломера (0, 90, 180 или 270°);
- составляющие, вызванные случайными наклонами акселерометров из-за неровностей поверхностей скольжения подвижной и неподвижной частей поворотной платформы — $\alpha_{слNg}$ и $\beta_{слNg}$.

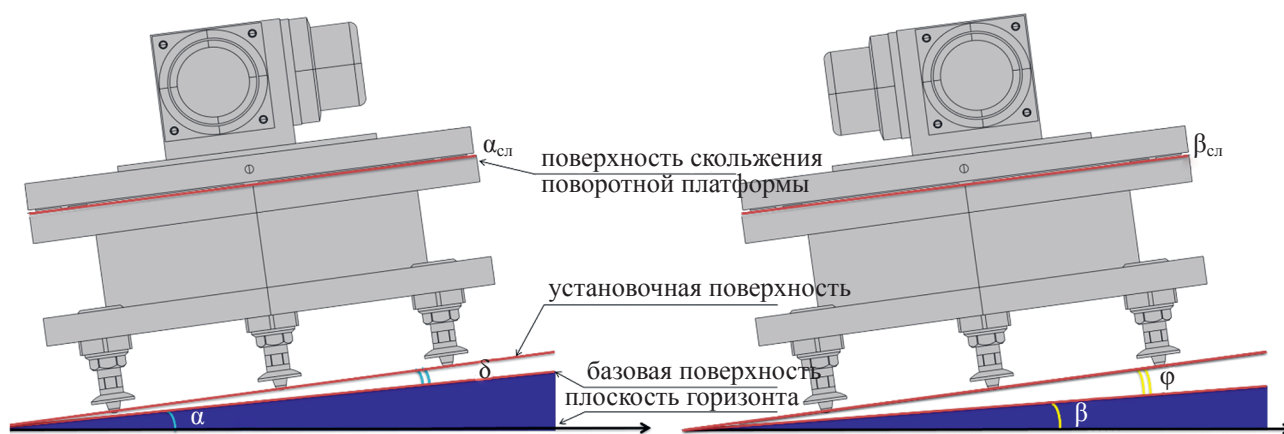


Рис. 3

Выходной сигнал $W_{1.N}$ первого акселерометра и $W_{2.N}$ второго акселерометра запишем в следующем виде:

* За малостью измеряемых углов в формулах используется не синус угла, а его величина.

$$\begin{aligned}
W_{1.0} &= \alpha g + W_{0.1} + g(\delta_0 + \alpha_{\text{сл}0}); & W_{2.0} &= \beta g + W_{0.2} + g(\varphi_0 + \alpha_{\text{сл}0}); \\
W_{1.90} &= -\beta g + W_{0.1} + g(-\varphi_{90} + \alpha_{\text{сл}90}); & W_{2.90} &= \alpha g + W_{0.2} + g(\delta_{90} + \alpha_{\text{сл}90}); \\
W_{1.180} &= -\alpha g + W_{0.1} + g(-\delta_{180} + \alpha_{\text{сл}180}); & W_{2.180} &= -\beta g + W_{0.2} + g(-\varphi_{180} + \alpha_{\text{сл}180}); \\
W_{1.270} &= \beta g + W_{0.1} + g(\varphi_{270} + \alpha_{\text{сл}270}); & W_{2.270} &= -\alpha g + W_{0.2} + g(-\delta_{270} + \alpha_{\text{сл}270}).
\end{aligned} \tag{1}$$

Согласно (1), углы наклона базовой поверхности по осям X и Y для первого акселерометра равны:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{W_{1.0} - W_{1.180}}{2g} - \frac{(\delta_0 + \delta_{180}) + (\alpha_{\text{сл}0} - \alpha_{\text{сл}180})}{2}, \\
\beta &= -\left(\frac{W_{1.90} - W_{1.270}}{2g} - \frac{(\varphi_{90} + \varphi_{270}) + (\beta_{\text{сл}90} - \beta_{\text{сл}270})}{2} \right).
\end{aligned} \tag{2}$$

Углы наклона базовой поверхности по осям X и Y для второго акселерометра равны:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{W_{2.90} - W_{2.270}}{2g} - \frac{(\delta_{90} + \delta_{270}) + (\alpha_{\text{сл}90} - \alpha_{\text{сл}270})}{2}, \\
\beta &= \frac{W_{2.0} - W_{2.180}}{2g} - \frac{(\varphi_0 + \varphi_{180}) + (\beta_{\text{сл}0} - \beta_{\text{сл}180})}{2}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Далее приведены результаты экспериментального определения углов δ_N и φ_N , соответствующих непараллельности поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности, а также представлены решения, минимизирующие вклад этих углов в результаты измерения, выполняемых наклономером. Перед этим рассмотрим подробнее погрешности чувствительных элементов прибора. Случайная составляющая выходного сигнала наклономера $\alpha_{\text{сл}Ng}$ и $\beta_{\text{сл}Ng}$ значительно меньше измеренного угла наклона поверхности и в представленной работе не учитывается.

Результаты исследования чувствительного элемента. Стабильность измерения наклона базовой поверхности акселерометром (чувствительным элементом наклономера) оценивалась путем сравнения его показаний с данными, полученными от электронного уровня типа Talyvel [13]. Электронный уровень располагался на верхней площадке кронштейна крепления акселерометров так, чтобы его измерительная ось была сонаправлена с измерительной осью одного из акселерометров (рис. 4). Электронный уровень и наклономер оставались неподвижны в течение всего периода изменения наклона базовой поверхности (72 ч).

По характеру кривых на рис. 5 видно, что суточные изменения температуры (ΔT) в лаборатории оказывают влияние на выходной сигнал наклономера ($\Delta\alpha$, $\Delta\beta$). Изменение температуры внутри акселерометра составило $\Delta T = 1,6^\circ\text{C}$, это привело к нестабильности измерения акселерометров наклономера $\Delta\alpha = 5,6''$ по оси X и $\Delta\beta = 4,1''$ — по оси Y . Изменение выходных сигналов акселерометров помимо изменения температуры окружающей среды также вызвано наклоном базовой поверхности. Для исключения влияния температуры акселерометров на измерение наклона базовой поверхности при длительных испытаниях можно обеспечить термостатирование наклономера или ввести алгоритмическую термокомпенсацию.

Были проведены расчеты с использованием алгоритмической термокомпенсации (рис. 6) по заранее определенным коэффициентам зависимости смещения нуля акселерометра от температуры. В этом случае нестабильность измерений акселерометров наклономера становится соизмеримой с нестабильностью показаний электронного наклономера типа Talyvel ($\pm 0,35''$). Полученные коэффициенты зависимости смещения нуля от температуры постоянны, они могут быть определены однократно с внесением в модель погрешностей акселерометра.

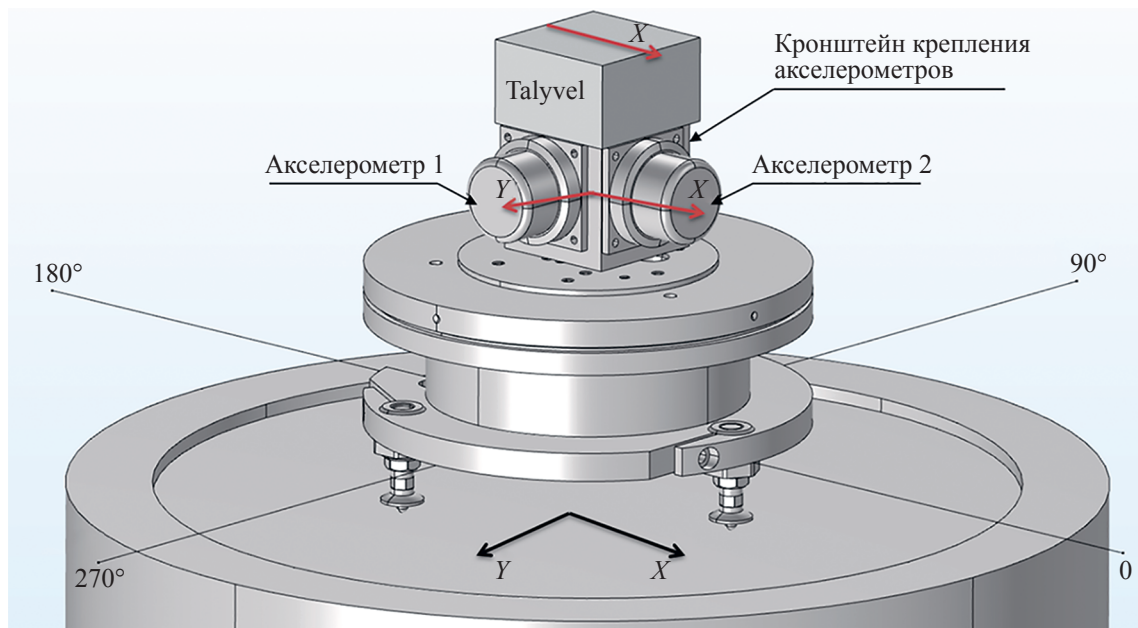


Рис. 4

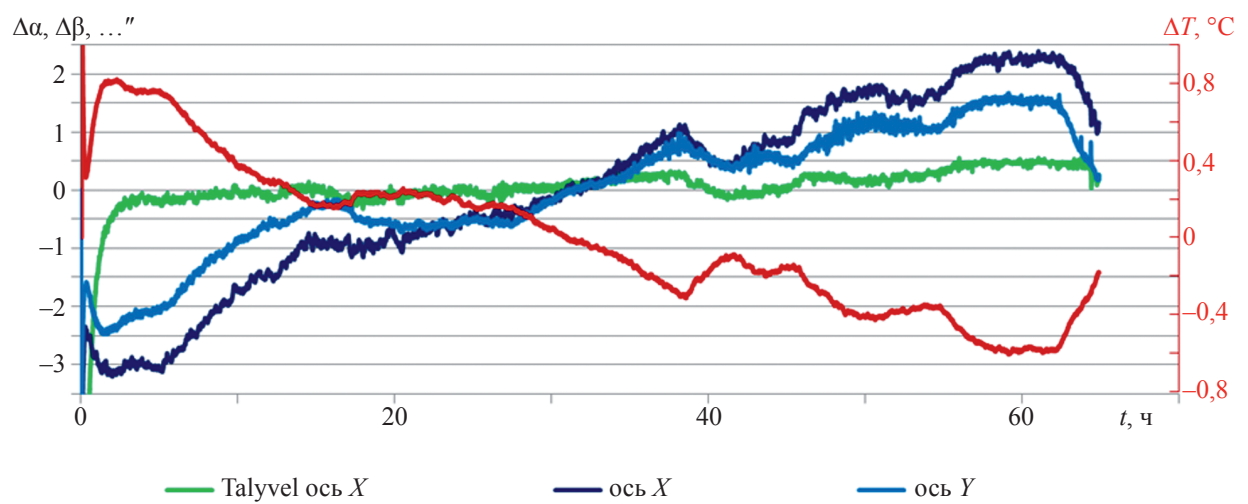


Рис. 5

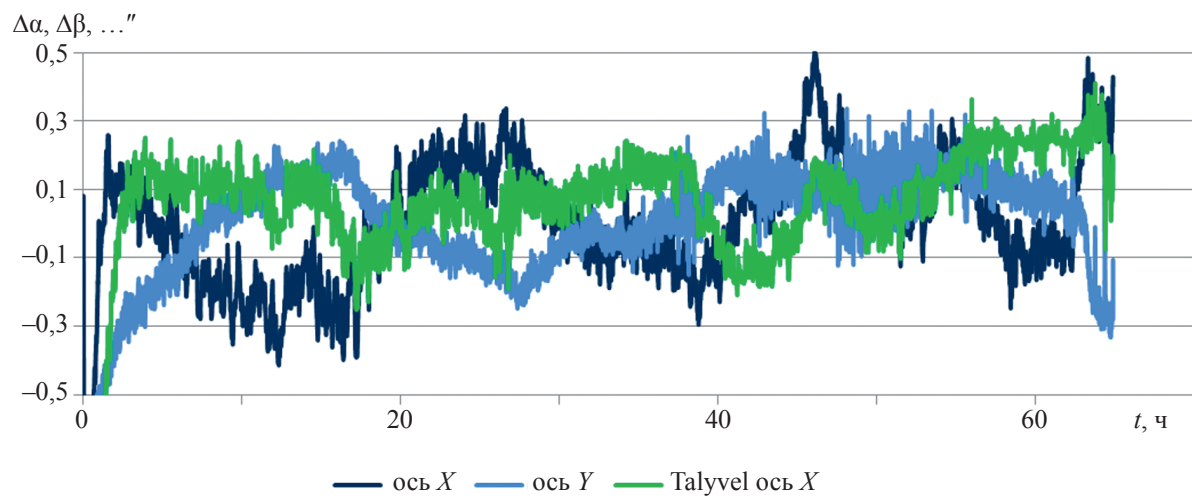


Рис. 6

Необходимо отметить, что при проведении измерений по описанной выше методике в двух противоположных точках на оси поворотного стола на коротком промежутке времени (не более 5 мин) введение термокомпенсации не требуется. Измерение таким методом позволяет избежать влияния изменения величины смещения нуля акселерометров во времени при изменении температуры.

Основная задача наклономера — учет наклонов базовых поверхностей лабораторных фундаментов, поэтому достаточное значение измеряемых углов составляет $\pm 600''$. В связи с этим была оценена погрешность измерения $\Delta\alpha$ чувствительного элемента наклономера в рабочем диапазоне углов α (рис. 7). Оценка производилась на поворотном столе „LabStandard+“ [14], погрешность наклона которого на малых углах не превышает $0,1''$. Проводится эта операция следующим образом: акселерометр устанавливается на кронштейн поворотного стола так, чтобы его ось чувствительности была перпендикулярна оси наклона. Затем определяется такое положение планшайбы поворотного стола, в котором выходной сигнал акселерометра имеет нулевую величину, т. е. измеренный угол наклона базовой поверхности равен нулю, после чего акселерометр наклоняется на $\pm 600''$ от зафиксированного значения и выполняется съем показаний чувствительного элемента. Полученные значения угла наклона сравниваются с задаваемыми значениями поворотного стола. Аналогичные измерения проводятся для второго акселерометра.

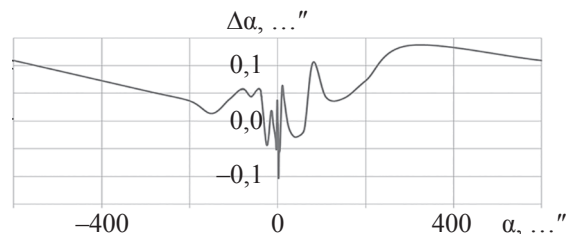


Рис. 7

Максимальное значение погрешности не превысило $\Delta\alpha = \pm 0,2''$, т. е. погрешность акселерометра находится в пределах погрешности поворотного стола. Таким образом, погрешности чувствительных элементов (акселерометров) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к наклономеру.

Результаты экспериментального исследования углов непараллельности поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности. Для исследования углов δ_N и φ_N непараллельности поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности поворотной платформы наклономер был установлен на поворотный стол „LabStandard+“. Эталонный уровень типа Talyvel был установлен так же, как и в предыдущем эксперименте, соосно одному из акселерометров (см. рис. 4).

В первую очередь был определен наклон относительно плоскости горизонта базовой поверхности планшайбы поворотного стола (см. таблицу). Затем в каждом положении поворотного стола ($0, 90, 180, 270^\circ$) было проведено определение угла его наклона путем выставки акселерометров поворотным устройством наклономера в положения $0, 90, 180, 270^\circ$.

Из таблицы видно, что при изменении азимутального положения акселерометров поворотным устройством наклономера и планшайбой поворотного стола углы наклона базовой поверхности изменяются. Разность между измерениями вызвана непараллельностью этих плоскостей, так как вращение происходит в различных плоскостях (см. рис. 3). Определим эти углы наклона базовой поверхности как разность между значениями, полученными при измерении наклона в различных положениях планшайбы поворотного стола, и значениями, полученными при измерении поворотной платформы наклономера следующим образом. Для положений планшайбы поворотного стола 0 и 180° углы, вызванные непараллельностью поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности δ (ось X) и φ (ось Y), составят:

$$\frac{A_0 - A_{180}}{2} - \frac{\alpha_0 - \alpha_{180}}{2} = \delta, \quad \frac{B_{90} - B_{270}}{2} - \frac{\beta_{90} - \beta_{270}}{2} = \varphi, \quad (4)$$

для положений планшайбы поворотного стола 90 и 270° имеем:

$$\frac{A_0 - A_{180}}{2} - \frac{\alpha_{90} - \alpha_{270}}{2} = \varphi, \frac{B_{90} - B_{270}}{2} - \frac{\beta_0 - \beta_{180}}{2} = \delta, \quad (5)$$

где A_0, A_{180} (B_{90}, B_{270}) — значения углов наклонов, полученные при измерении в положениях 0, 180 (90, 270°) планшайбы поворотного стола; α_N, β_N — значения углов наклонов, полученные при измерении в положениях $N = 0, 90, 180, 270^\circ$ поворотной платформы наклономера; $\delta = \frac{\delta_0 - \delta_{180}}{2}$, $\varphi = \frac{\varphi_{90} - \varphi_{270}}{2}$ — углы, вызванные непараллельностью поверхности скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхности по оси X и Y соответственно.

Положение измерений		Измеренный угол наклона базовой поверхности планшайбы поворотного стола		Рассчитанный угол непараллельности между поверхностью скольжения неподвижной части поворотной платформы и базовой поверхностью		
		акселерометр, ..."	Talyvel, ..."	угол	акселерометр, ..."	Talyvel, ..."
Вращение стола	$(A_0 - A_{180})/2$	–3,9	–4,1			
	$(B_{90} - B_{270})/2$	0,1	0,2			
$N = 0$	$(\alpha_0 - \alpha_{180})/2 + \delta$	–10,4	–10,4	δ	6,5	6,3
	$(\beta_{90} - \beta_{270})/2 + \varphi$	–2,1	–2,4	φ	2,2	2,6
$N = 90^\circ$	$-(\alpha_{90} - \alpha_{270})/2 - \varphi$	–1,4	–1,4	$-\varphi$	–2,5	–2,7
	$(\beta_0 - \beta_{180})/2 + \delta$	–6,0	–6,2	δ	6,1	6,4
$N = 180^\circ$	$-(\alpha_0 - \alpha_{180})/2 - \delta$	2,5	2,7	$-\delta$	–6,4	–6,8
	$-(\beta_{270} - \beta_{90})/2 - \varphi$	1,7	1,8	$-\varphi$	–1,6	–1,6
$N = 270^\circ$	$(\alpha_{90} - \alpha_{270})/2 + \varphi$	–6,3	–6,1	φ	2,5	2,0
	$-(\beta_0 - \beta_{180})/2 - \delta$	6,1	6,2	$-\delta$	–6,1	–6,0

Углы δ и φ , возникшие при установке наклономера на базовую поверхность, остаются некомпенсируемыми составляющими измеряемого угла. Эти углы могут быть минимизированы регулировочными винтами на этапе калибровки, остаточные значения должны паспорттизоваться. Минимизация углов непараллельности вращающейся платформы δ и φ относительно измеряемой поверхности позволит находить абсолютное значение углов наклона при установке наклономера на исследуемую поверхность и более точно определить абсолютные углы наклона поверхности α и β .

Заключение. В рамках проведенного исследования были выявлены инструментальные погрешности наклономера, состоящего из чувствительных элементов — акселерометров и поворотного устройства. Представлены результаты исследования чувствительных элементов и математическая модель наклономера, позволяющая учесть эти погрешности. Экспериментально показано, что, зная значения входящих в модель углов, можно минимизировать погрешность измерения угла наклона базовой поверхности. Остаточное значение этих углов предложено паспорттизовать и вносить в математическую модель наклономера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб: Электроприбор, 2009. 280 с.
2. Иванов П. А., Лазарев В. А., Бохман Е. Д. и др. Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2022. № 3. С. 80–93.
3. Калихман Д. М., Депутатова Е. А., Пчелинцева С. В. и др. Концепция проектирования класса прецизионных поворотных стендов с инерциальными чувствительными элементами в цепи обратной связи // Гироскопия и навигация. 2022. № 3. С. 41–64.

4. Коновалов С. Ф. Навигационные акселерометры: учеб. пос. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 220–225.
5. Асс Б. А. Детали и узлы авиационных приборов и их расчет. М.: ОБОРОНГИЗ, 1960. С. 285–288.
6. Евстифеев М. И. Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. 2007. № 2. С. 63–76.
7. Коновалов С. Ф. Никитин Е. А. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гиросинтезаторы. М.: Высш. шк., 1980. 128 с.
8. Нахов С. Ф. Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2021. 240 с.
9. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
10. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
11. Zeromatic dual-axis inclination sensor [Электронный ресурс]: <<http://Wylarag.com>>.
12. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers // IEEE Std 1293-2018 (Revision of IEEE Std 1293-1998), 2019, 28 Feb., 271 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8653544.
13. Электронный уровень Talyvel 6 [Электронный ресурс]: <<http://taylor-hobson.ru>>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Алексеевич Волобуев — ЦНИИ „Электроприбор“; ведущий инженер; E-mail: bullay@yandex.ru

Евгения Александровна Якушина — аспирант; ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: evgeniya.ykshn@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 25.12.24.

REFERENCES

1. Matveev V.V. *Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh system* (Fundamentals of Constructing Strapdown Inertial Navigation Systems), St. Petersburg, 2009, 280 p. (in Russ.)
2. Ivanov P.A., Lazarev V.A., Bokhman E.D., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, no. 3(13), pp. 180–188.
3. Kalikhman D.M., Deputatova E.A., Pchelintseva S.V., Gorbachev V.O. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, no. 3(13), pp. 155–169.
4. Konovalov S.F. *Navigatsionnyye akselerometry* (Navigation accelerometers), Moscow, 2023, pp. 220–225. (in Russ.)
5. Ass B.A. *Detali i uzly aviatsionnykh priborov i ikh raschet* (Parts and Units of Aircraft Instruments and Their Calculation), Moscow, 1960, pp. 285–288. (in Russ.)
6. Yevstifeyev M.I. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2007, no. 2, pp. 63–76. (in Russ.)
7. Konovalov S.F., Nikitin E.A. *Giroskopicheskiye sistemy. Proyektirovaniye giroskopicheskikh sistem. Ch. III. Akselerometry, datchiki uglovoy skorosti, integriruyushchiye giroskopy i girointegratory* (Gyroscopic Systems. Design of Gyroscopic Systems. Part III. Accelerometers, Angular Rate Sensors, Integrating Gyroscopes and Gyrointegrators), Moscow, 1980, 128 p. (in Russ.)
8. Nakhov S.F. *Opyt proyektirovaniya i izgotovleniya blokov izmeriteley lineynogo uskoreniya na kvartsevykh mayatnikovykh akselerometrah s analogovoy i tsifrovoy sistemami upravleniya* (Experience in Designing and Manufacturing Linear Acceleration Measuring Units on Quartz Pendulum Accelerometers with Analog and Digital Control Systems), Saratov, 2021, 240 p. (in Russ.)
9. Osadchiy E.P. *Proyektirovaniye datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* (Design of Sensors for Measuring Mechanical Quantities), Moscow, 1979, 480 p. (in Russ.)
10. Ponomarev S.D. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* (Calculation of Elastic Elements of Machines and Devices), Moscow, 1980, 326 p. (in Russ.)
11. <http://Wylarag.com>.
12. *IEEE Std 1293-2018 (Revision of IEEE Std 1293-1998)*, 2019, 271 p., DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8653544.
13. <http://taylor-hobson.ru>. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Sergei A. Volobuev — Concern CSRI Elektropribor; Leading Engineer; E-mail: bullay@yandex.ru

Evgeniya A. Yakushina — Post-Graduate Student; Concern CSRI Elektropribor;
E-mail: evgeniya.ykshn@yandex.ru

Received 10.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 25.12.24.